B A S E *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 2014 **18**(1), 83-96 *Le* **Point** *sur :*

Représentation du couvert forestier dans la modélisation hydrologique : comparaison de dix modèles (synthèse bibliographique)

Deborah Deraedt [(1)], Gilles Colinet [(1)], Hugues Claessens [(2)], Aurore Degré [(1)]

[(1)] Univ. de Liège - Gembloux Agro-Bio Tech. Unité Systèmes Sol – Eau. Passage des Déportés, 2. B-5030 Gembloux (Belgique). E-mail : Deborah.Deraedt@ulg.ac.be
[(2)] Univ. de Liège - Gembloux Agro-Bio Tech. Unité de Gestion des Ressources forestières et des Milieux naturels. Passage des Déportés, 2. B-5030 Gembloux (Belgique).

Reçu le 25 janvier 2013, accepté le 10 septembre 2013.

De nombreux modèles de simulation hydrologique existent, dont un certain nombre sont applicables en milieux forestiers. Cette synthèse bibliographique a pour objectif de comparer dix d'entre eux (BILJOU, EPIC, BROOK90, SWAT, RHESSys, MIKE SHE, SHETRAN, WaSiM ETH, DHSVM et Hydrus) afin d'éclairer le choix des utilisateurs potentiels. La comparaison est axée sur différents aspects de l'environnement forestier : l'interception, l'évapotranspiration, le prélèvement racinaire, l'effet du sous-étage, la croissance des arbres, ainsi que la validation de ces modèles. L'interception, lorsqu'elle est calculée, est traitée de manière similaire par neuf modèles sur les dix sélectionnés. Les modèles utilisent diverses méthodes de calcul de l'évapotranspiration potentielle et la plupart font intervenir la densité racinaire pour le calcul du prélèvement d'eau dans le sol. Le sous-étage et la croissance des arbres sont rarement pris en compte.
Mots-clés. Modélisation environnementale, couvert forestier, hydrologie, relation plante-eau, système racinaire, transpiration.

Forest cover representation in hydrological modeling: a comparison of ten models. A review. There are many hydrological models, some of which can be used for forested environments. This review aims to compare ten of these models (BILJOU, EPIC, BROOK90, SWAT, RHESSys, MIKE SHE, SHETRAN, WaSiM ETH, DHSVM and Hydrus) in order to provide guidance in the choice of model. The comparison of the models focuses on the following forest fluxes: interception, transpiration and root water uptake, root distribution, the understory effect, tree growth and model validation. The review underlines the fact that each model deals with forest fluxes in a different way. Most of the models deal with interception in a similar way, and root distribution is used in the process of root water uptake. Understory and growth are seldom considered.
Keywords. Environmental modelling, forest cover, hydrology, plant-water relations, root systems, transpiration.

1. INTRODUCTION

Les modèles hydrologiques forestiers se retrouvent plus que jamais au cœur de nombreuses études, que ce soit dans la thématique de l'adaptation des forêts aux changements climatiques (Granier et al., 1999 ; Tatarinov et al., 2009), de l'érosion des sols et du ruissellement (Dun et al., 2009) ou de l'impact de la gestion de la forêt sur le bilan hydrique (Ooba et al., 2010).

Les études qui se basent sur des modèles préexistants sont toutes confrontées à la question du choix du modèle qui sera appliqué. Bien souvent les raisons du choix d'un modèle ne sont pas expliquées, il arrive régulièrement qu'il s'agisse de l'application d'un modèle développé par les auteurs (Birkinshaw et al., 2010 ; Brolsma et al., 2010). La plupart du temps, lorsqu'une raison est invoquée, il s'agit du fait que le modèle a donné de bons résultats dans des études précédentes (Bormann et al., 2007 ; Holzel et al., 2011) et dans de rares cas, les auteurs justifient le choix par la prise en compte par le modèle d'un type de processus essentiel à l'étude ou au site étudié (Whitaker et al., 2003). Ce dernier critère devrait être prépondérant pour tous les utilisateurs de modèles. Dans les faits, des limitations viennent souvent s'ajouter, telles que la quantité et le type de données disponibles ou les ressources (temps et budget) disponibles.

L'objectif de cet article est de proposer une information technique objective qui puisse servir

de base pour la sélection d'un modèle hydrologique prenant en compte le couvert forestier. Nous nous focaliserons plus particulièrement sur la manière dont les modèles représentent les processus hydrologiques liés au couvert forestier.

2. PRÉSENTATION DES MODÈLES SÉLECTIONNÉS DANS LA LITTÉRATURE

Parmi la multitude de modèles existants, dix ont été sélectionnés afin de comparer leur représentation du couvert forestier. La sélection des modèles s'est faite selon le caractère récent des modèles et le nombre de publications les citant (**Tableau 1**). Ils forment un panel assez représentatif des modèles actuellement disponibles, couvrant toutes les distributions spatiales (globale, semi-spatialisée, spatialisée), des pas de temps allant de la minute (voire moins) à l'année, des modèles conceptuels aussi bien que physiques (selon la classification de Beckers et al., 2011), etc.

2.1. BILJOU

Le modèle BILJOU (Granier et al., 1995) est un modèle exclusivement forestier de bilan hydrique journalier global qui permet la quantification des flux d'eau et la caractérisation des stress hydriques (intensité, durée, fréquence) à l'échelle de la parcelle. Il a été développé afin d'être applicable à tout type de couvert. Les flux latéraux ne sont pas pris en compte, il incombe à l'utilisateur de choisir une parcelle présentant un flux latéral nul. La version décrite dans la littérature a été utilisée pour cet article.

2.2. BROOK90

BROOK90 (Federer et al., 2003) est un modèle journalier global à base physique permettant de prendre en compte les facteurs qui influencent les flux d'eau, tels que la croissance végétale, la biogéographie ou la fonte des neiges. Il travaille à l'échelle de la parcelle et n'est pas dédié à un type de milieu en particulier. Les paramètres décrivant les plantes et leur croissance sont fournis avec le modèle pour douze écosystèmes : forêt boréale sempervirente, parcelle cultivée, gazon court, arbustes sclérophylles, forêt tempérée décidue, forêt tempérée sempervirente, prairie tempérée, forêt tropicale décidue, forêt tropicale sempervirente, savane tropicale, toundra, désert (Federer, 2002).

2.3. DHSVM

DHSVM (*Distributed Hydrology Soil Vegetation Model*) est un modèle à base physique spatialement distribué permettant de nombreuses simulations de différents flux d'eau (et de leur réponse à la topographie et à la végétation) prenant en compte le climat et lorsque cela est souhaité, son évolution. Il est, par exemple, possible de simuler l'interception de la neige, la fonte de la couverture neigeuse et l'impact des routes sur les écoulements d'eau pour des bassins versants allant jusque plus de 104 km^2. Il permet des simulations annuelles, mensuelles ou journalières et est plus adapté aux milieux forestiers (Wigmosta et al., 2002).

2.4. EPIC

Le modèle EPIC (*Erosion Productivity Impact Calculator* ou *Environmental Policy Integrated Climate* depuis 1996) est un modèle journalier global initialement développé pour étudier les effets à long terme de l'érosion sur la productivité agricole. Il a ensuite été étendu à toutes sortes de simulations liées à l'agriculture. Il s'agit d'un modèle à base physique (Williams, 1995) qui fonctionne à l'échelle de la parcelle. Les valeurs des paramètres décrivant les plantes et leur croissance sont disponibles dans le manuel d'utilisateur du modèle SWAT qui, à quelques modifications près, utilise le même module de croissance des plantes. Un total de 79 plantes est ainsi répertorié, dont cinq espèces ligneuses : le pommier (*Malus domestica* Borkh.), le pin (*Pinus* sp.), le chêne (*Quercus* sp.), le peuplier (*Populus* sp.) et le mesquite (*Prosopis glandulosa* Torr.). La version EPIC1199 a été utilisée pour cet article.

2.5. Hydrus

Le modèle Hydrus permet la simulation des transferts d'eau (à l'aide des équations de Richards), de chaleur et de solutés dans le sol au pas de temps désiré. Ce modèle peut être utilisé en une, deux ou trois dimensions et donc aussi bien à l'échelle d'une colonne de sol, du versant ou du bassin versant. Il s'agit d'un modèle physique qui utilise la méthode des éléments finis (Radcliffe et al., 2010 ; Šimůnek et al., 2011). La taille des éléments simulés n'est pas limitée, si ce n'est par le temps de calcul. Bien qu'il permette la prise en compte de la végétation, il n'est pas spécialisé dans ce domaine.

2.6. Mike SHE

Le modèle Mike SHE (DHI Software, 2007) provient du Système Hydrologique Européen (SHE). Ce modèle physique spatialement distribué permet la simulation des flux d'eau aussi bien en milieu humide qu'en milieu semi-aride ou aride. Il couvre de nombreux domaines d'application, tels que le drainage, l'irrigation, la gestion des ressources en eau, la contamination de

Tableau 1. Tableau synthétique des caractéristiques des modèles sélectionnés — *Summary table of the characteristics of the selected models*.

Caractéristiques	Modèles									
	BILJOU	BROOK90	DHSVM	EPIC	Hydrus	Mike SHE	RHESSys	SHETRAN	SWAT	WaSiM
Distribution										
Globale	X	X		X						
Semi-spatialisée							X		X	
Spatialisée			X		X	X		X		X
Pas de temps										
Annuel			X		X	X				
Mensuel			X		X	X				
Journalier	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X*
Horaire					X	X	X	X		X
Dimensions inférieures					X	X		X		X
Phénomène étudié										
Interception	X	X	X	X		X	X	X	X	X
Calcul de l'ETP*	P	PM	PM	Hs-PT-PM		PM	PM	PM-P	Hs-PT-PM	W-Hn-PM-He
Prélèvement racinaire	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Distribution racinaire		X	X	X	X	X		X	X	X
Effet du sous-étage	X		X				X			X
Croissance des arbres				X					X	
Nombre de publications entre 2002-2012**	< 25	25-50	25-50	>50	>50	25-50	< 25	25-50	>50	>50

P : Penman ; Hs : Hargreaves ; PT : Priestley-Taylor ; PM : Penman-Monteith ; W : Wendling ; Hn : Hamon ; He : Haude ; **: obtenus à partir des bases de données *CAB abstract* et *Environment Complete* avec les mots-clés suivants — *got from the data bases CAB abstract and Environment Complete with the followning keywords* : « BILJOU », « BROOK90 », « DHSVM distributed hydrology soil vegetation model », « EPIC erosion productivity impact calculator OR EPIC environmental policy integrated climate », « Hydrus model hydrology », « MIKE SHE model hydrology », « RHESSYS », « SHETRAN», « SWAT model hydrology» et «WASIM model hydrology».

sites, l'impact des pratiques culturales, les effets du changement climatique, etc. Le modèle Mike SHE peut prendre les valeurs de pas de temps désirées (Refsgaard et al., 1995), bien qu'aucune publication concernant une simulation annuelle n'ait été trouvée. Il opère à l'échelle du bassin versant dont la taille peut dépasser 8 104 km² et n'est pas spécialisé dans un écosystème en particulier (DHI Software, 2007).

2.7. RHESSys

RHESSys *(Regional Hydro-Ecologic Simulation System*) est un modèle semi-distribué conçu dans le but de simuler les flux de carbone, d'eau et de nutriments. Tous ces processus sont décrits sur base physique. Ce modèle provient de l'assemblage de plusieurs autres modèles : MTN-*Clim model* pour les aspects de topographie et de météorologie, BIOME-BGC pour les flux au sein du couvert, ainsi que TOPMODEL et DHSVM pour l'humidité du sol et le ruissellement. RHESSys fonctionne au pas de temps horaire ou journalier et pour tous les environnements. Sa représentation hiérarchique du paysage permet de modéliser à l'échelle du bassin versant, du versant et de la parcelle (Tague et al., 2004).

2.8. SHETRAN

SHETRAN (SHE TRANsport) dérive lui aussi du SHE. Il permet la modélisation des flux d'eau, de solutés et de sédiments (Birkinshaw, 2011). Il s'agit d'un modèle physique spatialement distribué. Dans un premier temps développé pour simuler les bassins versants dans leur entièreté, il permet maintenant de représenter des parcelles présentant des limites avec flux d'eau. SHETRAN permet l'utilisation du pas de temps désiré entre la minute et le jour (Nasr et al., 2007) et la simulation de tout type d'environnement. Le bassin est divisé en éléments de base, éléments de berge et canaux et utilise la méthode des différences finies.

2.9. SWAT

SWAT (*Soil Water Assessment Tool*) comporte différents modules provenant d'autres modèles. Ainsi, le module de croissance des cultures a été développé à partir du modèle EPIC précédemment cité, l'évolution des pesticides provient du modèle GLEAMS, etc. Le modèle SWAT opère à l'échelle journalière, mais il est également possible d'obtenir les moyennes mensuelles ou annuelles des variables de sortie (Neitsch et al., 2011). Ce modèle à base physique semi-distribué a été créé dans le but de simuler le rendement agricole et les flux d'eau et de solutés sur le long terme. Initialement développé pour les milieux agricoles, il a été adapté de manière à pouvoir simuler les forêts. Il utilise les unités de réponse hydrologique (HRU) comme discrétisation spatiale. Aucune interaction n'est possible entre les HRU d'un même sous-bassin versant. L'eau de ruissellement de chaque HRU est transmise à la nappe aquifère profonde, stockée dans un réservoir ou encore transmise au chenal (Hollander et al., 2009). Le modèle a été conçu afin de pouvoir représenter des bassins versants de plus de 10 000 km².

2.10. WaSiM

Le modèle WaSiM (*WAter balance SImulation Model*) est la combinaison d'un modèle physique distribué détaillé et d'un modèle requérant peu de données. Il est capable de simuler des bassins versants d'une taille inférieure à 1 km² jusqu'à plusieurs dizaines de milliers de kilomètres carrés pour des pas de temps allant de la minute à plusieurs jours et pour toutes sortes de milieux. Il est utilisé pour la réalisation d'études d'impact environnemental, la prévision de ruissellement, la recharge des nappes, le transport de sédiments, etc. (Schulla, 2012).

3. ANALYSE DU MODE DE REPRÉSENTATION DES PROCESSUS HYDROLOGIQUES DU COUVERT FORESTIER

La modélisation sous couvert forestier et les flux pris en compte nécessitent une adaptation par rapport aux simulations sur sol nu ou agricole. Dans cette publication, la représentation de cinq de ces phénomènes sera détaillée : l'interception, la transpiration et le prélèvement racinaire, la distribution racinaire, l'effet du sous-étage et la croissance des arbres.

3.1. L'interception

L'interception est prise en considération par neuf des dix modèles sélectionnés, seul Hydrus n'en tient pas compte. Du point de vue du calcul de l'interception, l'unique ressemblance entre les modèles, excepté pour EPIC, est l'intervention d'un indice de couverture de la canopée. Il s'agit de la fraction de vide dans la canopée pour le modèle RHESSys et du LAI (*Leaf Area Index*) pour les sept autres modèles.

Pour BILJOU, l'interception est fonction de l'intensité de la pluie journalière et de la proportion de rayonnement intercepté, calculée à partir du LAI et d'un coefficient d'extinction (Granier et al., 1999).

BROOK90 calcule l'interception à partir des précipitations journalières, du LAI et du *Stem Area Index* (SAI) (Federer, 2002). Quatre autres paramètres, dont la valeur est déjà fixée par le modèle, sont nécessaires au calcul. Il s'agit de la fraction d'eau

interceptée et de la capacité d'interception maximale par unité de LAI et de SAI.

Pour DHSVM, la capacité de stockage maximale d'une cellule unité est fonction du LAI, de la portion de sol couvert par la canopée et du rapport entre le stockage maximum et le LAI. La fraction humide (1-fraction sèche) est fonction de la hauteur de pluie durant le pas de temps, de la hauteur d'eau déjà présente en début de pas de temps et de la capacité de stockage maximale de la canopée de la cellule unité (Wigmosta et al., 2002).

EPIC prend l'interception en compte dans la méthode SCS par une constante, nommée terme d'abstraction initiale, qui regroupe toutes les pertes d'eau précédant le ruissellement, telles que l'infiltration initiale, le stockage de surface, l'interception, etc. (Williams, 1995).

L'interception, dans Mike SHE, est fonction du LAI, de l'intensité de la pluie et de la capacité d'interception de la canopée qui dépend du type de couvert, du stade de développement, de la densité du peuplement, etc. (Refsgaard et al., 1995 ; DHI Software, 2007).

Pour RHESSys, l'interception est calculée comme étant le minimum entre la quantité d'eau maximale interceptée, qui dépend de la pluviométrie et de la fraction de vide, et la quantité d'eau que la canopée peut encore stocker, qui est fonction du PAI (*Plant Area Index*) et de la capacité d'interception spécifique (Tague et al., 2004).

L'interception de SHETRAN est fonction de la capacité de stockage maximale, du taux de couverture du sol, du LAI, de l'intensité de la précipitation, du taux d'évaporation, de la quantité d'eau nécessaire pour humidifier l'entièreté des feuilles et de deux paramètres décrivant la décharge du réservoir d'interception. Pour les forêts, il est conseillé de fixer la capacité de stockage maximale à 5 $mm \cdot m^{-2}$ (Newcastle University, sd[a]).

Dans SWAT, la capacité de stockage maximale de la canopée est déterminée pour chaque stade de développement de la plante à partir du rapport entre le LAI actuel et le LAI maximum, de la quantité maximale d'eau retenue par la canopée au LAI maximum (dont la valeur est sensée être connue) et des précipitations journalières (Neitsch et al., 2011).

WaSiM représente la capacité d'interception par un réservoir qui dépend du LAI, du degré de couverture de la végétation et de la hauteur d'eau maximale retenue par les feuilles (Schulla, 2012).

Comparaison de l'interception selon les différents modèles (Figure 1a à 1h). Une comparaison de la simulation de l'interception par les modèles sélectionnés est menée pour une pluviométrie allant de 0 à 15 mm, une évapotranspiration nulle et un stock d'interception initial nul. Les autres paramètres spécifiques à chaque modèle ont été fixés aux valeurs ou dans les gammes de valeurs préconisées par le modèle. BILJOU considère une interception totale de la pluie lorsque celle-ci est inférieure à 1 mm pour les feuillus et 2 mm pour les conifères. Au-delà de cette valeur, l'interception continue d'augmenter selon une exponentielle inverse. Les autres modèles présentent une évolution linéaire de la quantité d'eau interceptée, proportionnelle à la pluviométrie, suivie d'un palier dont la valeur est fixée par la capacité d'interception maximale de la canopée qui peut atteindre 5 mm (avec les valeurs de paramètres telles qu'utilisées) dans le cas du modèle SHETRAN. Ce palier de 5 mm est obtenu avec les valeurs de paramètres conseillées par le modèle ; si l'utilisateur ne les trouve pas appropriées, il lui est possible d'obtenir une évolution de l'interception presque similaire à celle des autres modèles en diminuant la valeur de la capacité maximale de stockage par la canopée. Cependant, nous pouvons observer, pour ce même modèle, l'absence d'impact du LAI dû à la valeur limite de celui-ci. En effet, lorsqu'il atteint une valeur supérieure à l'unité, SHETRAN utilise cette valeur unitaire dans ses calculs (Newcastle University, sd[a]). RHESSys présente une insensibilité au paramètre de fraction de vide de la canopée (gf), cela est dû au fait que l'équation utilisée comporte une fonction minimum, ce qui la rend sensible soit à l'indice de couverture de la plante (PAI), soit à la fraction de vide. Pour une pluie de 5 mm, l'interception oscille entre 0 et 5 mm selon les modèles. Les modèles BROOK90 et DHSVM calculent des interceptions plus faibles que les autres modèles. Dans le cas de BROOK90, deux paramètres (CINTRL et CINTRS), dont la valeur est imposée par le modèle, provoquent la faible quantité de pluie interceptée. Pour ce qui est de DHSVM, cela est dû à la valeur du paramètre de capacité de stockage maximum par unité de LAI proposée par le modèle. Si cette valeur est triplée, nous obtenons un graphique dont l'allure est similaire à la majorité des modèles.

3.2. L'évapotranspiration et le prélèvement racinaire

Tous les modèles, sauf Hydrus, se basent sur l'évapotranspiration potentielle pour calculer la quantité d'eau prélevée par le système racinaire. Une ou plusieurs formules de calcul de l'ETP sont proposées selon le modèle, la plus courante étant celle de Penman-Monteith (1965). Deux modèles, sur les dix sélectionnés pour cet article, ne font pas du tout intervenir l'effet de la distribution de la densité racinaire, il s'agit de BILJOU et de RHESSys.

Dans BILJOU, la transpiration est fonction du LAI, de la réserve en eau utile relative du sol et de l'évapotranspiration potentielle (ETP) calculée par la formule de Penman (1948). L'évapotranspiration réelle (ETR) comprend une composante supplémentaire représentant l'évapotranspiration de la strate herbacée.

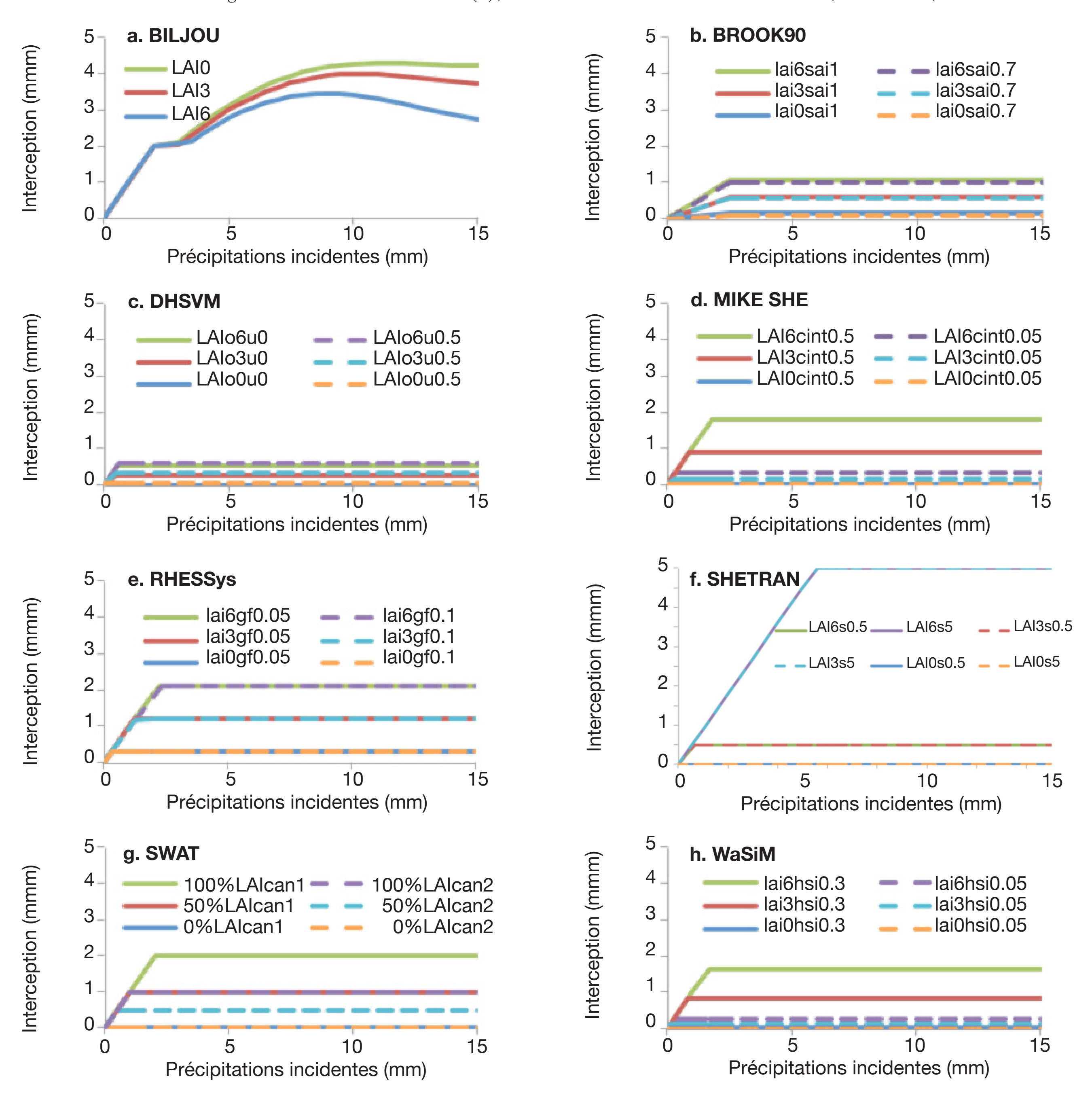


Figure 1. Comparaison de l'interception des modèles en fonction de la pluviométrie — *Comparison of the models interception in function of the rainfall rate*.

a : Pessière simulée dans BILJOU pour des LAI 0 ; 3 et 6 (correspond respectivement à un rayonnement intercepté relatif de 1 ; 4,5 et 20) — *Fire spruce stand with BILJOU for LAI of 0; 3 and 6 (correspond respectively to a relative light interception of 1; 4.5 and 20)* ; **b** : BROOK90 pour des LAI de 0 ; 3 et 6 et des SAI de 0,7 et 1 — *BROOK90 for LAI of 0; 3 and 6 and SAI of 0.7 and 1* ; **c** : DHSVM pour des LAI de la strate dominante (LAIo) valant 0 ; 3 et 6, des LAI du sous-étage (LAIu) de 0 et 0,5 et un taux de couverture du sol de 0,9 — *DHSVM with overstory cover LAI of 0; 3 and 6, the understory cover LAI is 0 and 0.5 and the soil coverage ratio is 0.9* ; **d** : MIKE SHE pour des LAI de 0 ; 3 et 6 et une capacité d'interception spécifique (cint) de 0,05 et 0,5 mm — *MIKE SHE for LAI of 0; 3 and 6, the maximum storage capacity (cint) is 0.05 and 0.5 mm* ; **e** : RHESSys pour des LAI de 0 ; 3 et 6 et une fraction de vide dans la canopée (gf) de 0,1 et 0,05. La capacité maximale de stockage de la pluie est fixée à 0,3 mm et le SAI à 1 — *RHESSys for LAI of 0; 3 and 6 and the gap fraction (gf) is 0.1 and 0.05. The maximum storage capacity is 0.3 mm and the SAI is 1* ; f : SHETRAN pour des LAI de 0 ; 3 et 6 et une capacité de stockage maximale (s) de 0,5 et 5 mm·m^{-2} — *SHETRAN for LAI of 0; 3 and 6 and the maximum storage capacity (s) of 0.5 and 5 mm·m^{-2}* ; **g** : SWAT pour des rapports LAI_{actuel}/LAI_{max} (%LAI) valant 0, 50 et 100 % des capacités maximales de stockage (can) égales à 1 et 2 mm — *SWAT model for LAI ratio (%LAI) equal to 0, 50 and 100% and the maximum storage (can) is 1 and 2 mm*; **h** : WaSiM pour un taux de couverture du sol de 0,9, des LAI de 0 ; 3 et 6 et une capacité maximale de stockage (hsi) de 0,3 et 0,05 mm — *WaSiM with a vegetation coverage ratio of 0.9, LAI of 0;ø 3 and 6 and the maximum storage capacity (hsi) of 0.3 and 0.05 mm*.

Elle dépend du rayonnement global incident et du LAI du couvert. La quantité d'eau transpirée est soustraite du réservoir symbolisant la réserve d'eau utile du sol. Celle-ci est fonction du volume de sol prospecté par les racines et des propriétés de rétention d'eau du sol. La transpiration est considérée faible voire nulle lors d'évènements pluvieux (Aussenac et al., 1979 ; Ehinger et al., 2009).

BROOK90 calcule la transpiration potentielle (T_p) à partir de l'ETP qui utilise la formule de Penman-Monteith (1965). La différenciation de l'évaporation de l'eau interceptée et de la transpiration potentielle se fait grâce à la méthode de Shuttleworth et Wallace (1985). La T_p dépend des potentiels hydriques du sol et des racines, ainsi que de la résistance au flux du xylème. Lorsque le potentiel hydrique des racines est supérieur au potentiel hydrique d'un horizon de sol, le prélèvement est nul pour cet horizon. Le sol est découpé en couches, non nécessairement identiques aux horizons pédologiques et de densité racinaire connue. Le prélèvement racinaire est réparti dans chaque couche (Federer, 2002).

DHSVM calcule l'évapotranspiration par la formule de Penman-Monteith (1965). La quantité d'eau totale prélevée par les racines est déduite de la différence entre l'ETP et l'eau interceptée par la canopée. Sa répartition dans les différentes couches de sol se fait selon la fonction de densité racinaire. Pour chaque type de couvert, la zone racinaire peut être divisée en plusieurs couches. La fraction de racines de l'étage dominant et du sous-étage est déterminée pour chaque horizon (Wigmosta et al., 2002).

EPIC et SWAT présentent la transpiration des plantes comme une fonction de l'évapotranspiration potentielle et du LAI, ainsi que de l'eau présente dans le sol. Trois formules sont disponibles pour le calcul de l'ETP : Hargreaves (1985), Priestley-Taylor (1972) et Penman-Monteith (1965). L'eau transpirée est retirée dans les différentes couches de sol suivant un paramètre de distribution de prélèvement d'eau. Dans le cas des arbres, le modèle estime que 50 % du prélèvement d'eau par les racines a lieu dans les 6 % supérieurs de la profondeur d'enracinement des arbres et que celle-ci est toujours égale à la profondeur maximale de l'espèce considérée. Il est également possible de calculer les prélèvements d'azote et de phosphore à partir des concentrations de ces éléments dans l'arbre et des quantités optimales pour la plante (ces quantités varient selon le stade de développement) (Williams, 1995 ; Neitsch et al., 2011).

Pour Hydrus, le taux de transpiration est fonction de la transpiration potentielle, de la distribution du prélèvement potentiel et d'une fonction de réponse au stress hydrique. Celle-ci peut suivre la formule de Feddes ou de van Genuchten. La première dépend uniquement du potentiel hydrique et permet de prendre en compte la réduction de transpiration lorsque le sol est proche de la saturation, tandis que la seconde est fonction des potentiels hydrique et osmotique. Hydrus permet également de tenir compte du fait que les racines peuvent compenser un stress hydrique (jusqu'à un certain point) par une augmentation du prélèvement d'eau dans une couche de sol plus humide et de calculer le prélèvement de nutriments. Il n'y a pas de distribution proprement dite, celle-ci est remplacée par la distribution du prélèvement hydrique dans la zone racinaire (Radcliffe et al., 2010 ; Šimůnek et al., 2011).

Mike SHE calcule l'évapotranspiration réelle globale du bassin versant par la formule de Kristensen-Jensen (Refsgaard et al., 1995) et requiert donc des valeurs d'évapotranspiration potentielle pour laquelle la formule de Penman-Monteith (1965) est conseillée. La transpiration est déterminée par le type de sol, l'humidité du sol et par la relation entre le LAI et le rapport évapotranspiration réelle et potentielle. L'eau interceptée, calculée à chaque pas de temps, est déduite du prélèvement racinaire. Dans chaque horizon, la distribution de l'eau prélevée dépend de la densité racinaire qui est fonction de la profondeur et de la densité apparente (DHI, Software 2007).

Pour RHESSys, la canopée étant divisée en plusieurs couches, l'ETP est calculée pour chacune de ces couches avec l'équation de Penman-Monteith (1965) et un rayonnement net adapté à chacune d'entre elles. Le calcul inclut l'évaporation de l'eau interceptée, la sublimation de la neige interceptée et la transpiration des couches vascularisées. Pour ce dernier point, le modèle distingue les composants exposés au soleil et ceux à l'ombre. La transpiration totale est fonction de la durée de la pluie du jour, de la longueur du jour et de l'évapotranspiration potentielle des feuilles exposées au soleil et de l'ETP des feuilles à l'ombre et cela, pour un déficit de pression de vapeur nul et moyen. Le modèle permet également de calculer le prélèvement de nutriments par les arbres (Tague et al., 2004).

Dans SHETRAN, l'évapotranspiration potentielle peut être calculée soit par la formule de Penman-Monteith (1965), soit par des valeurs d'ETP préétablies à partir de l'équation de Penman (1948) et modifiées pour prendre en compte les conditions d'humidité du sol. Dans ce dernier cas, il faut garder à l'esprit que ces valeurs sont systématiquement sous-estimées, car elles sont calculées pour un gazon de référence qui est moins haut et dont le LAI est plus faible que celui des arbres (Newcastle University, sd[b]). L'eau interceptée est évaporée et donc déduite de la quantité d'eau prélevée par les racines. La répartition du prélèvement dans le sol se fait selon la densité racinaire de chaque couche. Cette densité racinaire est fonction de la profondeur. Bien que le modèle n'y soit pas vraiment sensible

(Newcastle University, sd[a]), il propose des fonctions préétablies de densité racinaire.

Pour calculer l'ETP, WaSiM utilise la formule de Penman-Monteith (1965), de Wendling (1975), de Hamon (1961) ou de Haude (1955). Il est également permis de calculer l'évaporation d'une surface d'eau. Le calcul de l'ETR se fait ensuite soit avec l'approche Topmodel ou soit avec l'équation de Richards (selon la version de WaSiM utilisée) et est réduite par les stress hydrique et en oxygène (lorsque le sol est à saturation). La quantité d'eau prélevée par les racines est diminuée du stock d'eau interceptée. L'eau extraite par les racines est déduite, au centre de chaque horizon, de l'humidité du sol, en fonction de la densité racinaire de cet horizon. Le modèle présente la densité racinaire comme dépendant de la profondeur, de la profondeur d'enracinement maximale et de la forme du système racinaire. Lorsque les racines n'atteignent pas le fond d'une couche, le point d'extraction sera situé entre la limite supérieure de la couche de sol et la profondeur maximale atteinte par les racines. Si une couche de sol est trop sèche et ne permet pas le prélèvement de la quantité d'eau calculée, la couche suivante peut compenser ce manque jusqu'à une certaine limite (Schulla, 2012).

Comparaison des formules de calcul de l'évapotranspiration potentielle (Figure 2). Une comparaison des Ep simulées selon les différentes formules utilisées par les modèles sélectionnés est menée pour les mois d'avril et mai 2010 à partir des données IRM de la station météorologique d'Uccle (Belgique, 50°48'N, 4°21'E). Il s'agit des formules de Penman-Monteith (PM), Penman (P), Priestley-Taylor (PT), Hargreaves (Hs), Wendling (W), Hamon (Hn) et Haude (He) présentées en **annexe 1**. La **figure 2** montre que les équations de P, PT et W ont un comportement très similaire, mis à part un facteur multiplicatif. La formule de PM est assez semblable à celle de W. L'amplitude de variation de l'ETP est réduite avec l'équation de Hs, ceci est encore plus marqué pour celle d'Hn. Les valeurs d'évapotranspiration obtenues avec la formule de Haude sont presque systématiquement inférieures à celles obtenues avec toutes les autres formules. Seules quatre des sept formules proposées par ces modèles font intervenir un ou plusieurs paramètres dépendant des caractéristiques du couvert : Penman-Monteith inclut la résistance de canopée et la résistance aérodynamique, Penman la résistance aérodynamique, Wendling fait intervenir l'albédo et Haude possède un facteur mensuel empirique dont la valeur est dépendante du type de couvert. La station d'Uccle n'étant pas située en forêt, les résistances aérodynamiques n'ont pu être calculées pour ce type de milieu. Néanmoins, les valeurs obtenues sont du même ordre de grandeur que celles trouvées dans la littérature pour les couverts forestiers. La valeur retenue pour la résistance de canopée, de 100 sec·m^{-1} ; l'albédo fixé à 0,15 et le facteur empirique dont les valeurs mensuelles sont tirées de Schulla (2012), sont tous trois adaptés aux épicéas.

3.3. L'effet du sous-étage

Seuls quatre modèles permettent de prendre en compte un sous-étage : BILJOU, RHESSys, WaSiM et DHSVM. Tous les quatre représentent l'effet de cette strate de manière très différente.

Comme expliqué précédemment, BILJOU intègre dans l'ETR une composante correspondant à l'évapotranspiration de la strate herbacée (Ehinger et al., 2009).

DHSVM donne la possibilité à l'utilisateur de traiter un étage dominant et un sous-étage (mousse, herbes, etc.). L'étage supérieur peut couvrir l'entièreté d'une cellule unité ou une fraction de celle-ci, tandis que le sous-étage couvre toujours l'entièreté de la cellule unité. La présence d'un sous-étage annule la possibilité d'évaporation (Wigmosta et al., 2002).

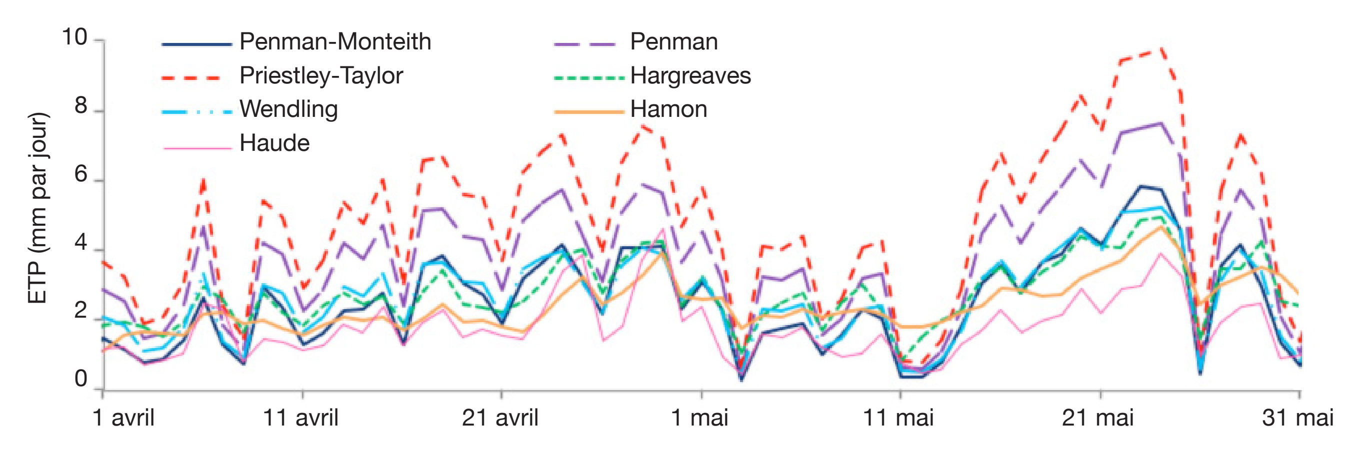


Figure 2. Comparaison de l'évapotranspiration simulée par les modèles sélectionnés — *Comparison of evapotranspiration simulated by the selected models* (Uccle, 2010).

RHESSys offre la possibilité d'introduire plusieurs essences simultanément, ainsi qu'une couche de mousse. Il divise la canopée en strates de LAI différents et le calcul de la transpiration et de la photosynthèse se fait séquentiellement selon la hauteur de chacune d'entre elles. Les précipitations, les radiations incidentes et le vent sont atténués par ces couches selon leurs caractéristiques et la hauteur des arbres (Tague et al., 2004).

WaSiM permet l'introduction de plusieurs couches de végétation par l'intermédiaire de deux tables de données. La première table reprend les valeurs des paramètres de chacune des essences présentes ; la seconde table donne la combinaison d'essences de chaque cellule du maillage (Schulla, 2012).

3.4. La croissance des arbres

La modélisation de la croissance des arbres peut avoir deux buts distincts ; soit décrire la production de biomasse ou productivité, utile pour le gestionnaire d'une parcelle, soit décrire l'évolution des caractéristiques du couvert au cours du temps, influençant la réponse du modèle. Tous les modèles, excepté Hydrus, permettent de tenir compte de la variation annuelle de LAI pour les forêts décidues. Les modèles BROOK90, DHSVM, Mike SHE, SHETRAN et WaSiM ne proposent pas de courbes d'évolution de LAI préétablies, c'est à l'utilisateur d'introduire les valeurs de LAI pour diverses dates.

BILJOU différencie les feuillus et les conifères. Ces derniers conservent un LAI constant tout au long de l'année. Pour les feuillus, BILJOU base sa courbe sur le LAI maximum, les dates de débourrement et de chute des feuilles. Il impose un délai de 30 jours pour atteindre le LAI maximal, ainsi que pour la perte totale du feuillage.

EPIC propose un calcul du LAI proche des formules utilisées par SWAT pour les cultures. Les variables utilisées pour ce calcul sont : la température moyenne journalière, la température de base pour la croissance de la plante, les paramètres de forme de la courbe LAI en fonction des PHU, le LAI maximum de la plante et le facteur de décroissance due à la sénescence. Le couvert est considéré mature pour les simulations, il en résulte que le LAI maximum atteint ne varie pas d'une année à l'autre. Le seul stress admis par le modèle est celui induit par la température.

Pour le modèle SWAT, l'évolution du LAI dépend de la température journalière moyenne de l'air, de la température de base pour la croissance de l'arbre, de l'âge de l'arbre, des paramètres de forme de la courbe LAI/degré-jours potentiels (PHU), du nombre d'années nécessaires pour atteindre la maturité et du LAI maximal. Le modèle permet l'utilisation de facteurs limitant l'accroissement du LAI tels que les stress hydrique, de température, d'azote et de phosphore (Neitsch et al., 2011).

Seuls EPIC et SWAT permettent le calcul de la productivité et de l'évolution de la hauteur de canopée.

EPIC présente une méthode de calcul identique pour les cultures et les arbres. La biomasse aérienne au jour j dépend de la concentration en CO_2 de l'atmosphère, du LAI, d'un coefficient d'extinction de la lumière, du rayonnement incident photosynthétiquement actif et de paramètres de forme. La croissance de biomasse peut être réduite par un stress hydrique, de nutriment, de température ou un manque d'oxygène. La hauteur des arbres est fonction des PHU et de la taille maximale de l'arbre. La profondeur d'enracinement dépend, quant à elle, de la profondeur maximale des racines et des PHU. Elle peut être affectée par des contraintes de température, de résistance du sol à l'enracinement et de la concentration en aluminium échangeable (Williams, 1995).

Le modèle SWAT utilise un code différent pour les arbres. L'accroissement de biomasse est fonction de l'âge de l'arbre, du nombre d'années nécessaires pour atteindre la maturité et de la biomasse maximale à maturité, tandis que la hauteur de canopée est calculée annuellement en fonction de l'âge des arbres. Ces résultats n'influencent ni le LAI qui suit les variations saisonnières imposées, ni la profondeur d'enracinement qui, dans le cas des arbres, reste constante tout au long de la simulation (Neitsch et al., 2011).

Comparaison de l'évolution du LAI au fil des saisons (Figure 3). Les trois modèles proposant un calcul du LAI, BILJOU, EPIC et SWAT, sont comparés à la **figure 3**. Les valeurs utilisées pour le modèle BILJOU sont tirées de la littérature, tandis que celles des modèles EPIC et SWAT sont les valeurs proposées par les modèles pour le pin (couvert mature). La température moyenne journalière est celle d'Uccle (Belgique, 50°48'N, 4°21'E) en 2010. BILJOU propose une représentation de l'évolution du LAI au cours du temps relativement simple et linéaire. Initialement développés pour des cultures annuelles, les modèles SWAT et EPIC prévoient la remise à 0 du LAI annuellement. Les deux modèles présentent une diminution du LAI différente, SWAT utilise une formule dépendante de la température, contrairement à EPIC.

4. CALIBRAGES ET VALIDATIONS DES MODÈLES

Tous les modèles sélectionnés ont fait l'objet de plusieurs validations (Granier et al., 1995 ; Bathurst et al., 2004 ; Cao et al., 2006 ; Jasper et al., 2006 ; Sahoo et al., 2006 ; Combalicer et al., 2010 ; Dai

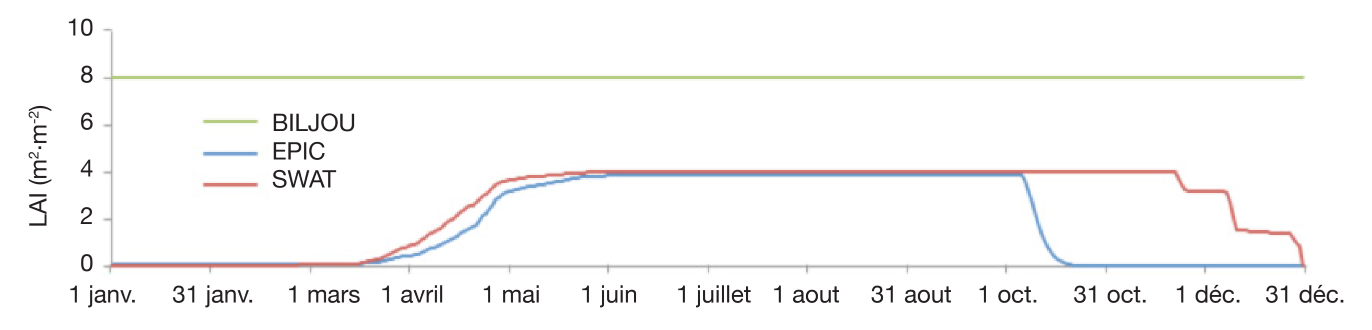


Figure 3. Comparaison de l'évolution du LAI du pin durant l'année 2010 — *Comparison of pine LAI evolution during 2010*.

et al., 2010 ; Wang et al., 2011 ; Natkhin et al., 2012 ; Safeeq et al., 2012 ; van der Heijden et al., 2013). La plupart du temps un calibrage a précédé cette étape, à l'exception des validations dites en aveugle (Bathurst et al., 2004). Bien que validés par plusieurs auteurs, certains modèles, comme BROOK90 et DHSVM, n'ont été vérifiés que pour le débit. Au contraire, les modèles RHESSys, SHETRAN et WaSiM-ETH ont subi une validation multicritère avec des paramètres tels que la couverture neigeuse et les flux de carbone pour RHESSys (Zierl et al., 2007), le niveau de nappe, le potentiel hydrique du sol et le transport de sédiments pour SHETRAN (Bathurst et al., 2004 ; Elliott et al., 2012) ou l'humidité du sol pour SHETRAN et WaSiM (Bathurst et al., 2004 ; Jasper et al., 2006). La plupart des modèles ont également fait l'objet de validation en milieu montagneux (Cao et al., 2006 ; Jasper et al., 2006 ; Sahoo et al., 2006 ; Safeeq et al., 2012). À l'exception d'EPIC, dont les seules validations trouvées se focalisent sur les milieux agricoles, tous les autres modèles ont déjà été validés en milieu mixte (milieu forestier, urbain, agricole, etc.). Quelques modèles ont été validés sur des parcelles ou des bassins versants entièrement boisés, notamment BILJOU pour une chênaie et une pessière (Granier et al., 1995), Mike SHE sur parcelle mixte feuillus/résineux (Dai et al., 2010) et RHESSys sous couvert d'un mélange de conifères (Band et al., 1993).

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La modélisation hydrologique en milieu forestier est au centre d'un bon nombre de problématiques actuelles (changements climatiques, érosions des sols, etc.). Pour répondre à cette demande, plusieurs modèles ont été développés ou améliorés dans le but d'intégrer l'impact de la forêt sur l'hydrologie des bassins versants.

L'article a mis en évidence les différences de représentation des principaux processus hydrologiques qui caractérisent le milieu forestier. Il s'agit de l'interception des précipitations, l'évapotranspiration, le prélèvement racinaire et la distribution des racines, l'effet du sous-étage et la croissance des arbres. Cette comparaison pourrait être étendue à d'autres processus importants, tels que les écoulements latéraux, les stress biotiques et abiotiques, etc.

L'interception est calculée de manière très diverse par les modèles mais, hormis BILJOU, les fonctions ont une allure similaire : une progression linéaire suivie d'un plateau. Lors de la comparaison des équations d'évapotranspiration utilisées par les différents modèles, nous avons observé que la seule différence entre les formules de Wendling (1975), de Penman (1948) et de Priestley-Taylor (1972) est un facteur multiplicatif. La formule de Penman-Monteith (1965) est assez proche de celle de Wendling. L'équation d'Hamon présente, quant à elle, une plus faible amplitude de variation des valeurs d'ETP simulées. La distribution racinaire est considérée, dans certains modèles, comme constante au sein d'une même couche de sol ; dans d'autres modèles, elle varie de manière continue en fonction de la profondeur. Le modèle Hydrus présente la particularité de la remplacer par la distribution du prélèvement dans le sol. Le sous-étage est rarement pris en compte dans les modèles. Lorsque c'est le cas, il peut être représenté par une strate simple ou multiple, dont un ou plusieurs paramètres peuvent varier. La croissance des arbres, du point de vue de la biomasse, est peu représentée dans les modèles, contrairement aux variations de LAI qui sont systématiquement prises en compte, sauf pour Hydrus. Nous pouvons remarquer que la description de ces phénomènes est différente selon le modèle. Le choix d'un modèle ne peut être fait en ignorant cette diversité. Ainsi, selon l'importance donnée par l'étude aux différents flux, un modèle peut se trouver plus adéquat qu'un autre, ceci rappelle le caractère simplificateur de toute modélisation (Singh, 1995). Par exemple, pour la modélisation de parcelles dont les essences sont multiples, les modèles WaSiM et RHESSys semblent plus appropriés en raison de leur représentation de la canopée qui permet, respectivement, la simulation de combinaisons d'essences dont les caractéristiques sont connues et de subdiviser la canopée en différentes couches de propriétés distinctes.

Il a également été mis en évidence que certains modèles avaient fait l'objet de validations plus poussées et plus nombreuses que d'autres. Il serait, dès lors, intéressant d'étendre les validations à toutes les sorties de ces modèles et de diversifier les milieux étudiés. Dans le cadre d'études qui requièrent un haut degré de précision du point de vue hydrologique, Hydrus semble le plus adéquat, bien que sa représentation des flux étudiés dans cet article pourrait être améliorée. Toutefois, lors de l'utilisation de tels modèles, il faut garder à l'esprit que si les valeurs de certains paramètres doivent être estimées avec une incertitude plus ou moins importante, la précision finale de la simulation en est modifiée. D'autres modèles pourraient faire l'objet d'améliorations. Par exemple, les modèles SWAT et EPIC ont une représentation du LAI qui, par défaut, propose une perte totale du feuillage à l'automne et ce, même pour des conifères. Dans le cas de SHETRAN, une possible amélioration concerne la valeur seuil du LAI qui empêche notamment la variation de l'interception lorsque l'indice foliaire dépasse ce seuil.

Liste des abréviations

ETP : ÉvapoTranspiration Potentielle
ETR : ÉvapoTranspiration Réelle
HRU : *Hydrological Response Unit* (Unité de réponse hydrologique)
LAI : *Leaf Area Index* (Indice foliaire)
PAI : *Plant Area Index* (Indice de couverture de la plante)
PHU : *Potential Heat Unit* (Degré-jours potentiels)
SAI : *Stem Area Index* (Indice de tige)

Bibliographie

Aussenac G. & Granier A., 1979. Étude bioclimatique d'une futaie feuillue de l'Est de la France : II. Étude de l'humidité du sol et de l'évapotranspiration réelle. *Ann. Sci. For.*, **36**(4), 265-280.

Band L.E., Patterson P., Nemani R. & Running S.W., 1993. Forest ecosystem processes at the watershed scale: incorporating hillslope hydrology. *Agric. For. Meteorol.*, **63**(1-2), 93-126.

Bathurst J.C. et al., 2004. Validation of catchment models for predicting land-use and climate change impacts: 3. Blind validation for internal and outlet responses. *J. Hydrol.*, **287**(1-4), 74-94.

Beckers É. & Degré A., 2011. Revue bibliographique : la prise en compte des transferts horizontaux dans les modèles hydrologiques. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, **15**(1), 143-151.

Birkinshaw S.J., 2011. *SHETRAN Web Site*. Newcastle upon Tyne, UK: School of Civil Engineering and Geosciences, Newcastle University, http://research.ncl.ac.uk/shetran/index.htm, (28/03/12).

Birkinshaw S.J, Bathurst J.C., Iroumé A. & Palacios H., 2010. The effect of forest cover on peak flow and sediment discharge – An integrated field and modelling study in central-southern Chile. *Hydrol. Processes*, **25**(8), 1284-1297.

Bormann H., Breuer L., Gräff T. & Huisman J.A., 2007. Analysing the effects of soil properties changes associated with land use changes on the simulated water balance: a comparison of three hydrological catchment models for scenario analysis. *Ecol. Model.*, **209**(1), 29-40.

Brolsma R.J., van Beek L.P.H. & Bierkens M.F.P., 2010. Vegetation competition model for water and light limitation. II: Spatial dynamics of groundwater and vegetation. *Ecol. Model.*, **221**(10), 1367-1377.

Cao W., Bowden W.B., Davie T. & Fenemor A., 2006. Multi-variable and multi-site calibration and validation of SWAT in a large mountainous catchment with high spatial variability. *Hydrol. Processes*, **20**(5), 1057-1073.

Combalicer E.A., Cruz R.V.O., Lee S. & Im S., 2010. Assessing climate change impacts on water balance in the Mount Makiling forest, Philippines. *J. Earth Syst. Sci.*, **119**(3), 265-283.

Dai Z. et al., 2010. Bi-criteria evaluation of the MIKE SHE model for a forested watershed on the South Carolina coastal plain. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **14**(6), 1033-1046.

DHI Software, 2007. *MIKE SHE User manual: volumes 1 & 2: User guide & User manual*. Hørsholm, Denmark: DHI.

Dun S. et al., 2009. Adapting the Water Erosion Prediction Project (WEPP) model for forest applications. *J. Hydrol.*, **366**(1-4), 46-54.

Ehinger G., Maurice D. & Heydt N., 2009. *Modèle de bilan hydrique forestier*. Champenoux, France : INRA, UMR Écologie et Écophysiologie Forestières, https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/index.php?p=accueil, (16/01/13).

Elliott A.H., Oehler F., Schmidt J. & Ekanayake J.C., 2012. Sediment modelling with fine temporal and spatial resolution for hilly catchment. *Hydrol. Processes*, **26**(24), 3645-3660.

Federer C.A., 2002. *BROOK 90: a simulation model for evaporation, soil water, and streamflow*, http://www.ecoshift.net/brook/brook90.htm, (16/1/2013).

Federer C.A., Vörösmarty C. & Fekete B., 2003. Sensitivity of annual evaporation to soil and root properties in two models of contrasting complexity. *J. Hydrometeorol.*, **4**(6), 1276-1290.

Granier A., Badeau V. & Bréda N., 1995. Modélisation du bilan hydrique des peuplements forestiers. *Rev. For. Fr.*, **XLVII**, 59-68.

Granier A., Bréda N., Biron P. & Villette S., 1999. A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecol. Model.*, **116**(2-3), 269-283.

Hamon W.R., 1961. Estimating potential evapotranspiration. *J. Hydraul. Div. Proc. Am. Soc. Civ. Eng.*, **87**, 107-120.

Hargreaves G.L., Hargreaves G.H. & Riley J.P., 1985. Agricultural benefits for Senegal river basin. *J. Irrig. Drain. Eng.*, **111**(2), 113-124.

Haude W., 1955. Zur bestimmung der verdunstung auf möglichst einfache weise. *Mitt. Dtsch. Wetterdienstes*, **2**(11), 1-24.

Hollander H.M. et al., 2009. Comparative predictions of discharge from an artificial catchment (Chicken Creek) using sparse data. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **13**(11), 2069-2094.

Holzel H., Rössler O. & Diekkrüger B., 2011. Grope in the Dark – Hydrological modelling of the artificial Chicken Creek catchment without validation possibilities. *Phys. Chem. Earth*, **36**(1-4), 113-122.

Jasper K., Calanca P. & Fuhrer J., 2006. Changes in summertime soil water patterns in complex terrain due to climatic change. *J. Hydrol.*, **327**(3-4), 550-563.

Monteith J.L., 1965. Evaporation and the environment. *In: Proceedings of the 19th Symposium of the Society for Experimental Biology, 8-12 September 1964, Swansea, UK*. Cambridge, UK: University Press, 205-234.

Nasr A. et al., 2007. A comparison of SWAT, HSPF and SHETRAN/GOPC for modelling phosphorus export from three catchments in Ireland. *Water Res.*, **41**(5), 1065-1073.

Natkhin M. et al., 2012. Differentiating between climate effects and forest growth dynamics effects on decreasing groundwater recharge in a lowland region in Northeast Germany. *J. Hydrol.*, **448**, 245-254.

Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R. & Williams J.R., 2011. *Soil and water assessment tool: theoretical documentation, version 2009*. Technical report No 406. College Station, TX, USA: Texas Water Resources Institute.

Newcastle University, sd(a). *SHETRAN Water Flow Component, Equations and Algorithms*. Newcastle upon Tyne, UK: School of Civil Engineering and Geosciences, Newcastle University, http://research.ncl.ac.uk/shetran/water%20flow%20equations.pdf, (12/03/12).

Newcastle University, sd(b). *SHETRAN Version 4, data requirements, data processing, and parameter values*. Newcastle upon Tyne, UK: School of Civil Engineering and Geosciences, Newcastle University, http://research.ncl.ac.uk/shetran/SHETRAN%20V4%20Data%20Requirements.pdf, (16/03/12).

Ooba M., Wang Q., Murakami S. & Kohata K., 2010. Biogeochemical model (BGC-ES) and its basin-level application for evaluating ecosystem services under forest management practices. *Ecol. Model.*, **221**(16), 1979-1994.

Penman H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, **193**(1032), 120-145.

Priestley C.H.B & Taylor R.J., 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. *Mon. Weather Rev.*, **100**(2), 81-92.

Radcliffe D.E. & Šimůnek J., 2010. *Soil physics with Hydrus: modeling and applications*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Taylor&Francis Group.

Refsgaard J.C. & Storm B., 1995. MIKE-SHE. *In*: Singh V.P., ed. *Computer models of watershed hydrology*. Highlands Ranch, CO, USA: Water Resources Publications, 809-846.

Safeeq M. & Fares A., 2012. Hydrologic effect of groundwater development in a small mountainous tropical watershed. *J. Hydrol.*, **428-429**, 51-67.

Sahoo G.B., Ray C. & De Carlo E.H., 2006. Calibration and validation of a physically distributed hydrological model, MIKE SHE, to predict streamflow at high frequency in a flashy mountainous Hawaii stream. *J. Hydrol.*, **327**(1-2), 94-109.

Schulla J., 2012. *Model Description WaSiM (Water balance Simulation Model), completely revised version 2012*. Zürich, Switzerland: Hydrology Software Consulting.

Shuttleworth W.J. & Wallace J.S., 1985. Evaporation from sparse crops – an energy combination theory. *Q. J. R. Meteorolog. Soc.*, **11**(469), 839-855.

Šimůnek J., van Genuchten M.T. & Šejna M., 2011. *The HYDRUS Software package for simulating the two- and three-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media: technical manual, version 2.0*. Prague, Czech Republic: PC Progress.

Singh V.P., 1995. *Computer models of watershed hydrology*. Highlands Ranch, CO, USA: Water Ressources Publications.

Tague C.L. & Band L.E., 2004. Regional Hydro-Ecologic Simulation System - An object-oriented approach to spatially distributed modeling of carbon, water, and nutrient cycling. *Earth Interact.*, **8**(19), 1-42.

Tatarinov F.A. & Cienciala E., 2009. Long-term simulation of the effect of climate changes on the growth of main Central-European forest tree species. *Ecol. Model.*, **220**(21), 3081-3088.

van der Heijden G. et al., 2013. Tracing and modeling preferential flow in a forest soil — Potential impact on nutrient leaching. *Geoderma*, **195-196**, 12-22.

Wang X.C., Li J., Tahir M.N. & De Hao M., 2011. Validation of the EPIC model using a long-term experimental data on the semi-arid Loess Plateau of China. *Math. Comput. Modell.*, **54**(3-4), 976-986.

Wendling U., 1975. Zur messung und schätzung der potentielle verdunstung. *Ztg. Meteorol.*, **25**(2), 103-111.

Whitaker A., Alila Y., Beckers J. & Toews D., 2003. Application of the distributed hydrology soil vegetation model to Redfish Creek, British Columbia: model evaluation using internal catchment data. *Hydrol. Processes*, **17**(2), 199-224.

Wigmosta M.S., Nijssen B. & Storck P., 2002. The distributed hydrology soil vegetation model. *In*:

Singh V.P. & Frevert D.K., eds. *Mathematical models of small watershed hydrology and applications*. Highlands Ranch, CO, USA: Water Resources Publications, 7-42.

Williams J.R., 1995. The EPIC model. *In*: Singh V.P., ed. *Computer models of watershed hydrology*. Highlands Ranch, CO, USA: Water Ressources Publications, 909-1000.

Zierl B., Bugmann H. & Tague C.L., 2007. Water and carbon fluxes of European ecosystems: an evaluation of the ecohydrological model RHESSys. *Hydrol. Processes*, **21**(24), 3328-3339.

(51 réf.)

Annexe 1. Formules de calcul de l'évapotranspiration potentielle.

Hamon

$$ETP = 0{,}1651 \cdot f_i \cdot \frac{h_d}{12} \cdot \frac{216{,}7 \cdot e_s}{T + 273{,}3}$$

Hamon, 1961

Hargreaves

$$ETP = 0{,}0022 \cdot R_a \cdot \sqrt{T_{\max} - T_{\min}} \cdot (T + 17{,}8)$$

Hargreaves et al., 1985

Haude

$$ETP = k_m \cdot e_s \cdot (1 - RH)$$

Haude, 1955

Penman

$$ETP = \frac{R_n \cdot \Delta + \frac{\rho \cdot c_p \cdot \delta_e}{r_a}}{\lambda \cdot (\Delta + \gamma)}$$

Penman, 1948

Penman-Monteith

$$ET = \frac{(H_{net} - G) \cdot \Delta + \frac{\rho \times c_p \cdot \delta_e}{r_a}}{\lambda \cdot \left(\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)\right)}$$

Monteith, 1965

Priestley-Taylor

$$ETP = \frac{\alpha_{pet}}{\lambda} \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot (H_{net} - G)$$

Priestley et al., 1972

Wendling

$$ETP = \left(RG \cdot (1{,}1 - \alpha) + 93 \cdot f_k\right) \cdot \frac{T + 22}{150(T + 123)}$$

Wendling, 1975